

铜片封装光纤光栅传感器的应变和温度传感特性研究*

于秀娟^{1,2} 余有龙^{1,3} 张 敏² 廖延彪² 赖淑蓉²

(1 黑龙江大学光纤技术研究所, 哈尔滨 150080)

(2 清华大学电子工程系光纤传感实验室, 北京 100084)

(3 暨南大学光电工程系, 广州 510632)

摘 要 提出了一种光纤光栅的铜片封装工艺, 并通过实验和理论分析研究了光纤光栅的应变和温度传感特性. 与裸光纤光栅的测试结果相比, 铜片封装工艺基本不改变光纤光栅应变传感的灵敏度, 但是温度灵敏度系数提高了 2.78 倍. 经过铜片封装后的光纤光栅可以探测到的应变和温度分别为 $1 \mu\epsilon$ 和 0.03°C , 便于工程应用.

关键词 光纤 Bragg 光栅; 封装工艺; 应变传感; 温度传感

中图分类号 TP212 **文献标识码** A

0 引言

随着光纤通信的发展, 光纤光栅应用到航空航天^[1~4]、土木工程^[5~9]、电力系统^[10]、石油化工^[11,12]、海洋平台^[13]等领域已经成为现实. 但目前还存在一定的问题, 主要是因为裸光纤光栅特别细且脆弱, 尤其是它的抗剪切能力很差, 直接将其作为传感器无法胜任实际应用中的恶劣环境, 如土木工程中粗放式施工、航空航天结构中的高温高压环境等. 因此, 对裸光纤光栅进行二次开发, 即对其封装或增敏处理^[14], 是光纤光栅传感器实际应用中推广的一个重要环节. 目前, 国内外对光纤光栅的封装工艺研究报道的不多, 研制满足实际应用要求的光纤光栅传感器具有重要意义. 鉴于此, 本文研究了光纤光栅铜片封装工艺, 并通过实验和理论分析了封装后光栅的应变和温度传感特性.

1 光纤光栅传感原理

由耦合模理论可知, 光纤光栅的 Bragg 波长为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Delta \quad (1)$$

式中为 n_{eff} 纤芯的有效折射率; Δ 为栅格周期.

由式(1)可见, Bragg 波长 λ_B 随 n_{eff} 和 Δ 的改变而改变. 由于温度和应变的变化都将引起 n_{eff} 和 Δ 发生变化, 所以光纤光栅对于温度和应变都是敏感的. 温度通过热光效应和热膨胀效应来影响 λ_B , 而应变则通过弹光效应和光栅周期 Δ 来影响 λ_B .

光纤光栅的 Bragg 波长随温度和应变的漂移为 $\Delta\lambda_B = K_T\Delta T + K_\epsilon\epsilon = (\alpha + \zeta)\lambda_B\Delta T + (1 - P_e)\lambda_B\epsilon$ (2) 式中 λ_B 为光纤光栅的中心波长, K_T 、 K_ϵ 分别为光纤光栅的温度和应变灵敏度系数, α 和 ζ 分别为光纤的热膨胀系数和热光系数, P_e 为有效弹光系数, ϵ 为轴向应变. 对于光纤为纯石英的情况^[15], P_e 的值约为 0.22, $\alpha = 0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\zeta = 6.67 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$. 如果取光纤光栅的中心波长分别为 1545 nm、1550 nm、1555 nm 时, 计算得应变灵敏度系数 K_ϵ 分别为 1.205 pm/ $\mu\epsilon$ 、1.209 pm/ $\mu\epsilon$ 、1.212 pm/ $\mu\epsilon$, 温度灵敏度系数 K_T 分别为 11.16 pm/ $^\circ\text{C}$ 、11.19 pm/ $^\circ\text{C}$ 、11.23 pm/ $^\circ\text{C}$. 由此表明, 当光纤光栅中心波长变化不大时, 其应变和温度灵敏度系数约为 1.2 pm/ $\mu\epsilon$ 和 11.2 pm/ $^\circ\text{C}$. 但是, 由于采用的光纤不同、写入光栅的工艺以及退火工艺的差别, 不同光纤光栅的传感灵敏度会有差异, 尤其光纤光栅经过封装以后, 封装材料会极大地改变光纤光栅的传感特性, 因此封装后的光纤光栅必须经过标定才能用作实际测量.

2 光纤光栅铜片封装工艺

光纤光栅的铜片封装工艺如图 1. 将光纤光栅

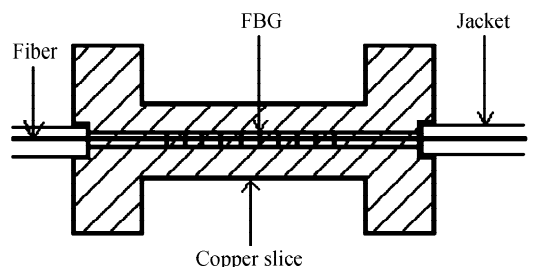


图 1 铜片封装光纤光栅
Fig. 1 The picture of the FBG sensor packaged by the copper slice

*国家自然科学基金与中国节能投资公司联合研究基金 (60177029)、国家 863 高技术计划(2001AA602011-11)资助
Tel: 010-62781372 Email: xiujuanyu@163.com
收稿日期: 2005-06-13

用双组分的 M-Bond 610 胶封装在刻有细槽的铜片内部,铜质为黄铜。封装时,力图保证光纤光栅平直并位于细槽的地面中轴线上。用注射器向槽内注入 M-Bond 610 胶时,要适当加热以增加胶的流动性,保证槽内充满密实,并减小形成气泡的可能性,还要保证胶不溢出槽外。为了保护两端的光纤,分别在两端加上保护套,而保护套可以固定在铜片两端预先加工的开孔内。

3 铜片封装光纤光栅的应变和温度传感特性

3.1 实验设备

本实验所用的光纤光栅波长解调系统为清华大学光纤传感研究中心自行研制的三通道光纤光栅解调仪,波长分辨率 1 pm,波长检测范围为 1525~1565 nm. 电阻应变仪为 YJK4500 静态应变仪。实验中所用的光纤光栅为单模光纤,其中心波长分别为 1551.3 nm、1546.5 nm,反射率大于 80%,3 dB 带宽小于 0.2 nm. 电阻应变片的型号为 S2120-5AA,有效标距为 5 mm.

3.2 铜片封装光纤光栅的应变传感特性

为了研究铜片封装后的光纤光栅传感器的应变传感特性,把封装好的光纤光栅传感器(中心波长为 1551.3 nm)和裸光栅(中心波长为 1546.5 nm)用 502 胶粘贴于经过抛光处理的等强度梁上,同时在相应的位置布设高准确度的电阻应变片,通过砝码加载,得到的波长应变曲线如图 2. 其中方格代表铜片封装光纤光栅传感器,实心圆代表裸光栅。从图中可以看出,铜片封装光纤光栅传感器应变传感的线性很好,波长和应变的相关系数达到了 0.9999. 与裸光栅的波长应变相关系数 1 相比,说明铜片封装光纤光栅具有良好的应变传感性能。

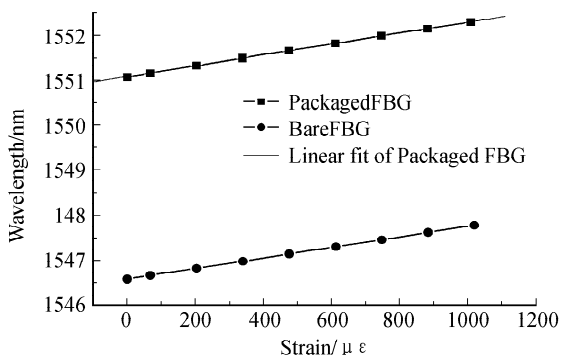


图 2 光纤光栅波长-应变曲线

Fig. 2 The curve of the FBG wavelength versus strain

为了验证封装后的光纤光栅传感器应变传感的重复性,实验中进行多次加载卸载实验,得到如图 3 的波长-应变关系(这里给出两个循环对应的数据)。

从图中可以看出,铜片封装光纤光栅传感器具有良好的重复性,两次加载卸载过程曲线对应的斜率分别为 $1.24 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 、 $1.23 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 、 $1.23 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 、 $1.22 \text{ pm}/\mu\epsilon$,斜率最大值和最小值偏差为 1.6%,这说明铜片封装的光纤光栅传感器具有很好的应变重复传感能力. 取斜率的平均值 $1.23 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 作为铜片封装光纤光栅传感器的应变灵敏度系数,这与实验中裸光栅的应变灵敏度系数 $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 相差很小,从而证明封装工艺的有效性. 其微小差别产生的原因是由于铜片具有一定的厚度,在等强度梁受弯变形时,根据梁体的平截面假设,其应变比梁表面要大. 但是在受拉变形下,就不会出现该情况. 因此,在实际应用中,应该根据结构受力形式的不同,进行必要的误差修正。

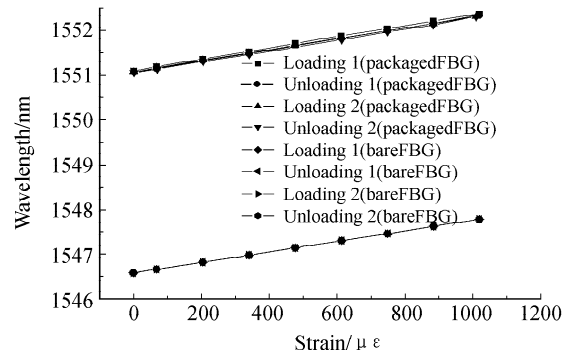


图 3 加载卸载过程中的波长-应变曲线

Fig. 3 The curve of the FBG wavelength versus strain during the loading

3.3 铜片封装光纤光栅的温度传感特性

为了研究铜片封装光纤光栅的温度传感特性,把封装好的光纤光栅放入温控箱中,温控箱的温度分辨率为 0.1°C . 从室温下开始加热,加热间隔为 10°C ,一直加热到 100°C . 为了减小由温度不平衡带来的误差,均在恒温后一个小时记录数据. 实验中测的铜片封装光纤光栅的波长随温度变化的曲线如图 4. 实心圆代表铜片封装光纤光栅传感器的波长温度曲线,正三角代表裸光栅的波长温度曲线. 从图中可以看出,两条曲线的斜率相差很大,裸光栅的斜率为 0.01124 ,

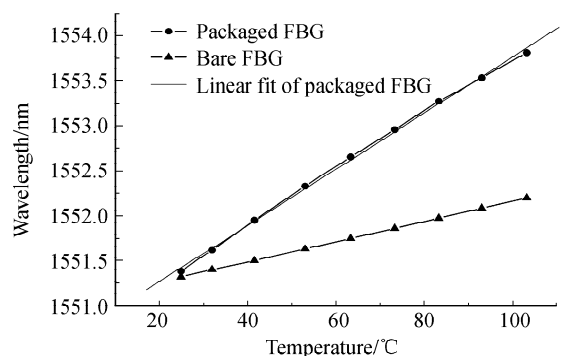


图 4 光纤光栅波长-温度曲线

Fig. 4 The curve of the FBG wavelength versus temperature

封装后的光栅的斜率为 0.03122,这说明光栅经铜片封装后其温度灵敏度系数提高了 2.78 倍. 裸光栅的温度灵敏度系数为 11.24 pm/°C,铜片封装光纤光栅传感器的温度灵敏度系数为 31.22 pm/°C.

实验证明,铜片封装光纤光栅传感器的温度灵敏度系数比裸光栅提高了 2.78 倍. 光栅经铜片封装以后,光栅材料的热光系数没有改变,但光栅随着封装基体材料铜片热胀冷缩,即光栅的热膨胀性质将发生改变,封装后的波长变化与温度变化的关系为^[16]

$$\Delta\lambda'_B = \lambda_B [(\alpha + \zeta) + (1 - P_e)(\alpha_{\text{sub}} - \alpha)] \Delta T \quad (3)$$

式中, α_{sub} 为母体或基体材料的热膨胀系数,实验中铜的热膨胀系数 α_{sub} 为 $16.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. 则封装后的光栅的温度灵敏度系数为

$$K'_T = \lambda_B [(\alpha + \zeta) + (1 - P_e)(\alpha_{\text{sub}} - \alpha)] = 30.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$$

由前文可知,封装前的光纤光栅的温度灵敏度系数的理论值为约 11.2 pm/°C. 理论分析表明,封装后的光纤光栅的温度灵敏度系数理论上提高了 2.72 倍,而实验值为 2.78 倍,误差为 2%,这说明实验结果与理论分析相符.

4 结论

本文通过对铜片封装光纤光栅传感器的应变温度传感特性的研究,发现铜片封装光纤光栅基本没有改变其应变传感特性,但使温度灵敏度系数提高了 2.78 倍,即为 31.22 pm/°C. 同样用其它热膨胀系数较大的材料做基底封装光纤光栅也可以提高光栅的温度灵敏度系数,封装后的光纤光栅传感器的温度分辨率会明显提高. 实验中所用的光纤光栅解调仪的分辨率为 1 pm,裸光栅可以准确识别到 1 $\mu\epsilon$ 和 0.1°C. 经铜片封装后,光纤光栅可以准确识别到 1 $\mu\epsilon$,而温度分辨率明显提高,可以识别到 0.03°C 的准确度.

上述铜片封装光纤光栅传感器结构简单灵巧,而且很容易固定到被测物体上,通过复用可以构成光纤光栅传感网络来检测大范围空间应变和温度等其他物理量的测量,尤其适用于航空航天结构、复合材料、土木工程建筑结构等的健康监测,具有广阔的应用前景.

参考文献

- 1 Michael N T, Karsten W, Daniel B, *et al.* Smart sensing of aviation structures with fiber-optic Bragg grating sensors. *Proc of SPIE*, 2000, **3986**: 134~143
- 2 Wolfgang E, Stephan G, Ines L, *et al.* Optical fiber grating sensor network basing on high-reliable fibers and components for spacecraft health monitoring. *Proc of*

- SPIE*, 2001, **4328**: 160~167
- 3 Daniel B, Lothar S, Michael N T, *et al.* Test of a fiber Bragg grating sensor network for commercial aircraft structures. *Optical fiber sensors Conference technical digest, Proc of S-15*, 2002, **1**: 55~58
- 4 Toshimichi O, Masakazu S, Satoshi K, *et al.* Development of damage monitoring system for aircraft structure using a PZT actuator/FBG sensor hybrid system. *Proc of SPIE*, 2004, **5388**: 425~436
- 5 John S, Eric U, Whitten S, *et al.* Development and deployment of fiber optic highway and bridge monitoring systems. *Proc of SPIE*, 2000, **3995**: 479~482
- 6 Sandeep T V, Bryan A, Gregg J, *et al.* Quasi-static strain monitoring during the push phase of a box-girder bridge using Bragg grating sensors. *Proc of SPIE*, 1998, **3483**: 205~208
- 7 Sean C, Jason M. Bridge structural health monitoring system using fiber grating sensors: development and preparation for a permanent installation. *Proc of SPIE*, 2004, **5391**: 61~71
- 8 欧进萍, 周智, 武湛君, 等. 黑龙江呼兰河大桥的光纤光栅智能监测技术. *土木工程学报*, 2004, **37**(1): 45~49
Ou J P, Zhou Z, Wu Z J, *et al.* *China Civil Engineering Journal*, 2004, **37**(1): 45~49
- 9 董兴法, 付圣贵, 姜莉, 等. 用于结构损伤诊断的实用型光纤光栅传感器研究. *光子学报*, 2004, **33**(1): 28~30
Dong X F, Fu S G, Jiang L, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 28~30
- 10 李军, 卞超, 吴 . 电力电缆光纤光栅测温在线监测系统. *江苏机电工程*, 2005, **24**(1): 6~8
Li J, Bian C, Wu J. *Jiang Shu Electrical Engineering*, 2005, **24**(1): 6~8
- 11 郭团, 乔学光, 贾振安, 等. 光纤光栅传感技术及其在石油工业中的应用. *测试技术学报*, 2004, **18**(3): 208~213
Guo T, Qiao X G, Jia Z A, *et al.* *Journal of Test and Measurement Technology*, 2004, **18**(3): 208~213
- 12 张向东, 李育林, 彭文达, 等. 光纤复合型油气井下压力温度测量系统. *光子学报*, 2003, **32**(7): 864~867
Zhang X D, Li Y L, Peng W D, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 864~867
- 13 Dong S L, Hong N L, Liang R, *et al.* Experiments on an offshore platform model by FBG sensors. *Proc of SPIE*, 2004, **5391**: 100~106
- 14 詹亚歌, 蔡海文, 耿建新, 等. 铝槽封装光纤光栅传感器的增敏特性研究. *光子学报*, 2004, **33**(8): 952~955
Zhan Y G, Cai H W, Geng J X, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 952~955
- 15 Jung J, Nam H, Lee B. Fiber Bragg grating temperature sensor with controllable sensitivity. *Applied Optics*, 1999, **38**(13): 2752~2754
- 16 Liu Y Q, Guo Z Y, Zhang Y. Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer-coated fiber Bragg grating. *Electronics Letters*, 2000, **36**(6): 564~566

Study on the Strain and Temperature Densing Characteristics of FBG Packaged by the Copper slice

Yu Xiujuan^{1,2}, Yu Yonglong^{1,3}, Zhang Min², Liao Yanbiao², Lai Shurong²

1 Research Institute of Fiber Optics, Heilongjiang University, Harbin 150080

2 Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

3 Institute of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632

Received date: 2005-06-13

Abstract In this paper, the copper slice packaging technique for FBG sensor was developed in consideration of bare optical fiber being fragility, and then the strain and temperature characteristics of the packaged FBG sensor were experimentally and theoretically studied. Compared with the experimental results of the bare FBG, the strain sensing property of the FBG sensor packaged by the copper slice is nearly the same as that of the bare FBG, however the temperature sensing ability of the packaged FBG sensor is improved and the temperature sensitivity coefficient is 2.78 times as much as that of the bare FBG. The strain and temperature resolution of the packaged FBG sensor are $1 \mu\epsilon$ and 0.03°C . The packaged FBG sensors can be used easily in engineering.

Keywords Fiber Bragg grating; Packaging technique; Strain sensing; Temperature sensing



Yu Xiujuan was born in 1980 and received her B. S. degree from Heilongjiang University in 2003. Now she is studying for the M. S. degree at the same university. At present she is working at Optical Fiber Sensor Lab, Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University. Her research interests are optical fiber sensing and fiber Bragg grating sensing.